

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

С.А. Мартынов, А.Н. Русяев

Научный руководитель: м.н.с., к. ф.-м. н. С.А. Мартынов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

E-mail: [martynov@ispms.tsc.ru](mailto:martynov@ispms.tsc.ru)

**INVESTIGATION IN THE MICROSTRUCTURE FORMATION OF TITANIUM PRODUCTS  
OBTAINED BY ADDITIVE MANUFACTURING**

S.A. Martynov, A.N. Rusyayev

Scientific Supervisor: Dr. S.A. Martynov

Institute of Strength Physics and Materials Science of the SB RAS

Russia, Tomsk, 2/4, pr. Akademicheskii, 634055,

E-mail: [martynov@ispms.tsc.ru](mailto:martynov@ispms.tsc.ru)

***Abstract.** The regularities in the microstructure and phase composition of the 3D printed commercially pure titanium and Ti-6Al-4V titanium alloy specimens are studied using optical and transmission electron microscopes as well as X-ray diffractometer.*

**Введение.** В настоящее время наблюдается громадный интерес к исследованию и разработке аддитивных технологий, среди которых наиболее актуальным является металлическое направление — производство деталей для сложных узлов авиационной, транспортной и оборонной техники [1]. В отличие от традиционных методов получения конструкционных материалов, в процессе 3D-печати, как правило, формируется неоднородная микроструктура, обусловленная комплексным влиянием процессов быстрой кристаллизации, направленного охлаждения и фазовых переходов, вызванных повторяющимися термическими циклами (при нанесении последующих слоев каждый сформировавшийся слой еще до трех раз испытывает переход из твердого состояния в жидкое и обратно). В частности, в различных областях 3D-напечатанных титановых изделий могут формироваться квазиравноосные зерна или видманштеттова структура, выделяться  $\alpha''$ - или  $\omega$ -фазы, интерметаллидные частицы и др. В связи с вышесказанным целью данной работы является исследование закономерностей формирования микроструктуры 3D-напечатанных образцов титана BT1-0 и BT6, полученных методом электронно-лучевого сплавления.

**Материалы и методы исследования.** В настоящей работе исследовали образцы из технического титана BT1-0 и титанового сплава BT6, полученные прокаткой, а также полученные методом электронно-лучевой плавления соответствующих порошков на установке 6E400, оснащенной электронной пушкой с плазменным катодом и манипулятором, перемещающимся в трех взаимноперпендикулярных плоскостях. Морфологию поверхности и микроструктуру образцов исследовали с помощью оптического микроскопа Zeiss Axiovert 25. Дефектную субструктуру исследуемых образцов определяли методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100.

Идентификация фаз проводилась с применением темнопольной методики. Фазовый состав образцов изучали методами рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000S в  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении. Измерение микротвердости исследуемых образцов выполняли на микротвердомере ПМТ-3 с использованием пирамидки Виккерса (нагрузка составляла 50 г).

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** В отличие от равноосных зерен, формирующихся в прокатанных образцах ВТ1-0, напечатанные изделия, полученные путем электронно-лучевого плавления порошка технического титана ВТ1-0, характеризуются зернами со средним размером 800-1000 мкм, имеющими мартенситную структуру (рис. 1). Наличие последней связано с тем, что в процессе быстрой кристаллизации наплавленного слоя (скорость остывания достигает  $10^4 \text{ K/c}$  [1]) в условиях высоких градиентов температуры, а также сильного искажения кристаллической решетки первоначально образованные зерна  $\beta$ -фазы испытывают  $\beta \rightarrow \alpha'$  превращение по бездиффузионному мартенситному механизму с образованием пластинчатой  $\alpha'$ -фазы. Мартенситные пластины ориентированы в различных направлениях и их поперечный размер достигает 5-10 мкм. Наличие мартенситной структуры обуславливает высокую микротвердость напечатанных изделий из технического титана ВТ1-0 (3700 МПа), что существенно превышает микротвердость прокатанных образцов (1600 МПа). Поскольку  $\alpha'$ -фаза титана не выявляется методом рентгеноструктурного анализа, то рентгенограммы образцов ВТ1-0, находящегося в состоянии прокатки и полученного методом 3D-печати отличаются лишь преимущественной ориентацией структуры в направлении (002) (рис. 2).

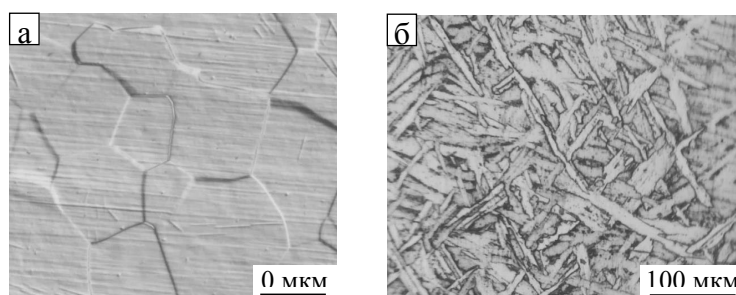


Рис. 1. Микроструктура образцов технического титана ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки (а) и полученного методом электронно-лучевого плавления (б)

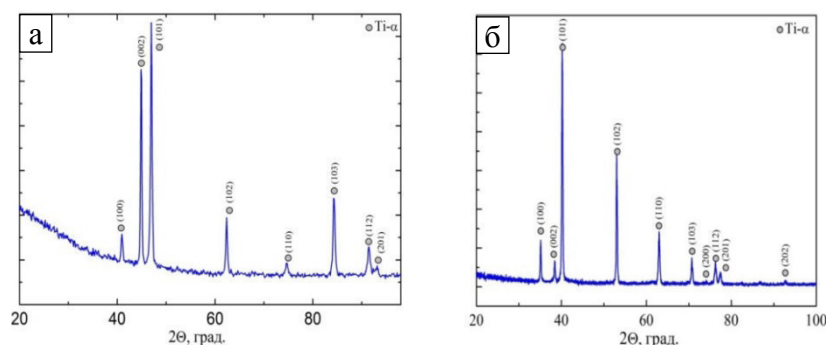


Рис. 2. Рентгенограммы образцов технического титана ВТ1-0, находящихся в состоянии поставки (а) и полученного методом электронно-лучевого плавления (б)

Структура 3D-напечатанных титановых образцов из титанового сплава ВТ6 характеризуется наличием крупных (средний размер  $\sim 200$  мкм) зерен, состоящих из пластин  $\alpha$ -Ti и прослоек  $\beta$ -Ti (рис. 3). Подобная структура характерна для листового сплава ВТ6, подвергнутого закалке от  $960^\circ\text{C}$  в воду и старению при  $550^\circ\text{C}$  в течение 4 часов. По данным рентгеноструктурного анализа объемная доля  $\beta$ -фазы в 3D-напечатанных образцах ВТ6 не превышает 3%, что оказывается существенно меньше по сравнению с титановым сплавом ВТ6, полученным традиционными технологиями (рис. 4). При этом микротвердость напечатанных образцов ВТ6 составляет 4400 МПа, что превышает твердость закаленных и состаренных образцов (3600 МПа).

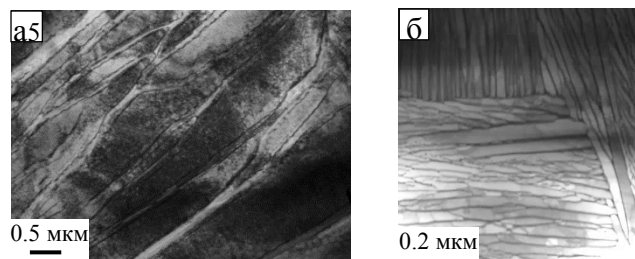


Рис. 3. ПЭМ-изображения структуры образцов титанового сплава ВТ6, находящихся в состоянии поставки (а) и полученного методом электронно-лучевого плавления (б)

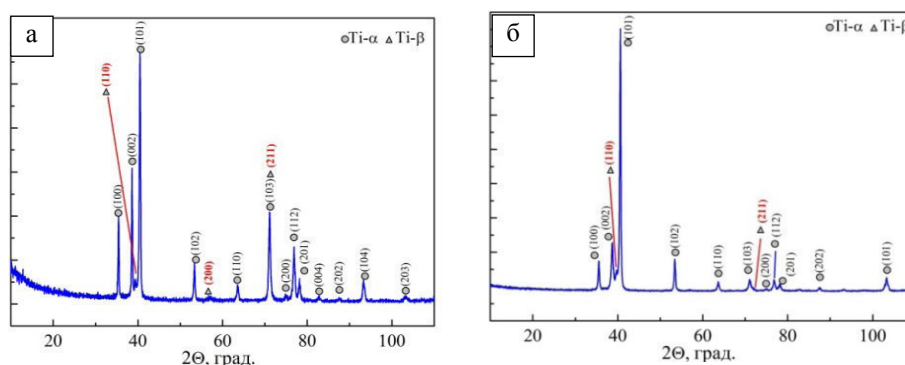


Рис. 4. Рентгенограммы образцов титанового сплава ВТ6, находящихся в состоянии поставки (а) и полученного методом электронно-лучевого плавления (б)

**Выводы.** Отработана технология получения объемных изделий из титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 методом электронно-лучевого сплавления порошка. Показано, что вследствие высокой скорости охлаждения наплавленного слоя в образцах технического титана ВТ1-0 формируется зерна со средним размером 800-1000 мкм, состоящие из пластинчатой  $\alpha'$ -фазы. Микротвердость напечатанного образца составляет 3200 МПа, что значительно больше, чем у образца в состоянии поставки.

В процессе плавления порошка из титанового сплава ВТ6 микроструктура образцов представляет собой крупные зерна со средними размерами 200 мкм, состоящие из пластин  $\alpha$ -Ti и прослоек  $\beta$ -Ti. По сравнению с образцами ВТ6, находящимися в состоянии поставки, 3D-напечатанные образцы характеризуются более высокой твердостью, достигающей 4400 МПа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.